

煤粉对选矿废水中乙硫氮的吸附特性研究

边 岳^{1,2,3,4,5}, 苏 鑫^{1,2,3,4}, 何红兴^{1,2,3,4}, 杜丽伟^{1,2,3,4}, 张 静^{1,2,3,4}

(1. 煤科院节能技术有限公司, 北京 100013; 2. 国家水煤浆工程技术研究中心, 北京 100013; 3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 4. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室, 北京 100013; 5. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要:为探究煤粉吸附剂对选矿废水中有机污染物的吸附过程, 利用煤粉作为吸附剂用于选矿废水中乙硫氮污染物的吸附。研究煤粉吸附剂自身物理化学性质特点, 并通过配制乙硫氮污染物模拟废水, 研究煤粉投加量、吸附时间等吸附条件对吸附过程的影响, 重点研究煤粉吸附剂吸附乙硫氮污染物的吸附等温线、吸附速率控制过程等。结果表明煤粉吸附剂表面结构复杂, 具有丰富的孔隙结构和含氧官能团, 是一种天然吸附剂。煤粉投加量和吸附时间是影响吸附效果的重要因素, 随着煤粉投加量增加, 溶液中乙硫氮去除率先增加后趋于稳定, 吸附量不断减少; 随着吸附时间延长, 乙硫氮去除率和吸附量开始时增加比较迅速, 吸附时间达到 30 min 后, 去除率和吸附量均趋于稳定。乙硫氮溶液初始浓度 50 mg/L, 煤粉投加量 5 g/L, 振荡吸附时间 30 min 条件下, 乙硫氮去除率达 86.53%, 吸附量为 8.65 mg/g。利用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型拟合煤粉对乙硫氮的吸附行为, Freundlich 等温吸附模型更加符合该吸附过程, 说明其吸附行为是以表层为主的多层吸附。利用准一级动力学方程、准二级动力学方程和颗粒内部扩散模型进行吸附动力学研究, 结果表明该吸附过程更加符合准二级动力学模型, 吸附速率的控制步骤同时包含外部液膜扩散、表面扩散以及颗粒内部扩散过程, 但以表面扩散为主导作用。

关键词:煤粉; 废水; 乙硫氮; 等温吸附线; 吸附动力学

中图分类号: X751

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2019)06-0171-06

Study on adsorption characteristics of diethyldithiocarbamate in mineral processing wastewater by coal

BIAN Yue^{1,2,3,4,5}, SU Xin^{1,2,3,4}, HE Hongxing^{1,2,3,4}, DU Liwei^{1,2,3,4}, ZHANG Jing^{1,2,3,4}

(1. China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China; 2. National Coal Water Mixture Engineering Technology Research Center, Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 4. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China; 5. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to explore the adsorption process of coal powder for organic pollutants on the wastewater from mineral processing, coal powder was used as an adsorbent to adsorb diethyldithiocarbamate in mineral processing wastewater. The physical and chemical properties of coal powder were investigated, and the adsorption conditions such as dosage and adsorption time on the adsorption process were explored through the preparation of simulated wastewater containing ethynyl sulfide nitrogen pollutant. In addition, the adsorption isotherms and adsorption rate control process of the adsorption of diethyldithiocarbamate by coal powder were emphatically studied. The results show that coal powder is a natural adsorbent with complex surface structure, abundant pore structure and oxygen-containing functional groups. The addition amount of coal powder and adsorption time are important factors affecting the adsorption effect. With the increase of the amount of coal powder, the removal rate of diethyldithiocarbamate in the solution first increases, then stabilizes, and the adsorption amount decreases continuously. With the increase of adsorption time, the removal rate and adsorption amount increase rapidly at the beginning, and both become stable after 30 min. The removal rate and adsorbed amount of diethyldithiocarbamate are 86.53% and 8.65 mg/g respectively with initial concentration of diethyldithiocarbamate 50 mg/L, dosage of coal powder 5 g/L and adsorption time 30 min. What is more, the

收稿日期: 2018-11-14; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.18111401

作者简介: 边 岳 (1992—), 男, 河北保定人, 硕士, 主要从事吸附剂开发和工业水处理研究工作。E-mail: bianyues@163.com

引用格式: 边岳, 苏鑫, 何红兴, 等. 煤粉对选矿废水中乙硫氮的吸附特性研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(6): 171-176.

BIAN Yue, SU Xin, HE Hongxing, et al. Study on adsorption characteristics of diethyldithiocarbamate in mineral processing wastewater by coal[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(6): 171-176.



移动阅读

Langmuir and Freundlich isotherm adsorption models are used to fit the adsorption behavior of pulverized coal to ethionine, and the Freundlich isotherm adsorption model is more consistent with the adsorption process, indicating that the adsorption behavior was multilayer adsorption based on surface. The adsorption kinetics is studied by using the quasi first order kinetic equation, the quasi second order kinetic equation and the particle internal diffusion model. The adsorption of diethyldithiocarbamate by coal powder is better in accordance with the Pseudo-second-order kinetic model. The control steps of the adsorption rate included external liquid film diffusion, surface diffusion and particle diffusion, but surface diffusion is the dominant factor.

Key words: coal powder; wastewater; diethyldithiocarbamate; adsorption isotherm; adsorption kinetics

0 引言

乙硫氮(三水合二乙基二硫代氨基甲酸钠, $(C_2H_5)_2NCSSNa \cdot 3H_2O$, 分子量 225.3, 极性分子有机物)因具有选择性好、捕收效率高、药耗量低等优势而广泛用于金属硫化矿物浮选过程的捕收剂^[1-2]。选矿厂矿石多为多种金属共伴生矿石, 通常需要多道浮选过程联合使用, 药剂种类复杂, 大量乙硫氮等有机药剂残存于浮选废水中, 直接回用于浮选环节会严重影响选矿指标, 直接排放则会造成水体化学需氧量(COD)超标, 水质恶化, 对环境造成严重污染^[3-5]。针对选矿废水排放量大、成分复杂、不易自然沉降等特点, 国内外学者主要通过降解法、吸附法、化学氧化法、生物法和膜处理等方法净化废水^[6-8], 使废水在不影响选矿生产工艺指标的基础上最大程度实现回收利用, 节约水资源。其中, 吸附剂吸附法处理有机污染废水可达到较好的效果, 因此一些学者采用不同吸附剂(如活性炭^[9], 树脂^[10]等)对选矿废水进行吸附试验研究, 但这些吸附剂普遍存在成本高、吸附后脱附困难、脱附有机污染物转移、多次吸脱附回收使用后吸附效果变差等问题, 难以实现工业化, 廉价吸附剂的开发是目前吸附法处理废水的重要方向。

煤作为我国重要能源, 其比表面积大, 可作为多孔材料用于吸附研究^[11]。现阶段将煤作为吸附剂用于工业废水处理的研究较少, 煤表面富含含氧官能团, 对有机物具有天然的吸附能力, 在相关研究中, 有学者利用焦煤粉对焦化废水进行吸附处理^[12], 达到了较好的效果, 废水中 COD 浓度从 178.99 mg/L 降至 43.56 mg/L, 去除率达 75.66%, 笔者前期利用煤粉作为吸附剂用于吸附喹啉模拟废水^[13], 也取得了较好的吸附效果, 且煤炭价格低廉, 吸附污染物后的煤粉无需脱附处理, 可直接作为煤化工或热电厂原料, 煤粉吸附的有机污染物会随焚烧而彻底消解, 不会产生污染物的转移, 弥补了其他吸附剂的不足, 由此可见将煤作为吸附剂用于处理乙硫氮废水是可行的。

本文对煤粉吸附剂自身物理化学特性进行研究, 探究煤粉投加量、吸附时间等吸附条件对煤粉吸附乙硫氮污染物过程的影响, 利用 Langmuir、Freundlich 两种等温吸附模型对数据拟合, 进行吸附热力学分析, 利用 Lagergren 准一级动力学方程、Lagergren 准二级动力学方程和 Weber-Morris 颗粒内部扩散模型对数据拟合, 进行吸附动力学分析, 以此完成煤粉吸附剂对乙硫氮污染物吸附过程的探究及机理分析。

1 试验

1.1 仪器与试剂

试验仪器: Perkin Elmer 2400 系列 II 型 CHNS/O 元素分析仪(珀金埃尔默企业管理(上海)有限公司); FEI Quanta TM 250 型扫描电子显微镜(FEI 公司); BELSORP-max 型 BEL 全自动氮气吸附仪(BEL-JAPAN, INC 公司); NICOLET is5 型傅里叶变换红外光谱仪(美国赛默飞公司); UV-4802S 型双光束紫外可见分光光度计(上海尚阔仪器技术有限公司); SHA-CA 水浴恒温振荡器(金坛市江南仪器厂)。

试验试剂: 煤粉(中国陕西神木长焰煤, 粒度低于 0.074 mm 含量达 85%); 乙硫氮(AR, 国药集团化学试剂有限公司); 碳酸氢钠(AR, 国药集团化学试剂有限公司); 碳酸钠(AR, 国药集团化学试剂有限公司); 氢氧化钠(AR, 国药集团化学试剂有限公司); 盐酸(AR, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 试验方法

Boehm 滴定法是利用不同强度的碱性和酸性表面氧化物反应的可能性对氧化物进行定性和定量的一种方法。Boehm 滴定法中, 碳酸氢钠用于中和煤粉表面的羧基, 碳酸钠中和羧基和内酯基, 氢氧化钠中和羧基、内酯基和酚羟基, 盐酸可中和碱性基团, 本文利用 Boehm 滴定法对煤粉表面的含氧官能团含量进行测定。

在锥形瓶中配置一定浓度的乙硫氮溶液, 加入一定量的煤粉吸附剂后置于水浴恒温振荡器中振荡

一定时间,利用布氏漏斗和真空泵对锥形瓶中的混合物进行抽滤,收集滤液后利用紫外分光光度计(乙硫氮特征波长 256 nm)测定其吸光度,计算乙硫氮的去除率和吸附量。去除率和吸附量公式为

$$\gamma = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$Q_t = (C_0 - C_t) V / M \quad (2)$$

式中, γ 为去除率,%; C_0 为乙硫氮初始浓度,mg/L; C_t 为吸附时间为 t 时剩余乙硫氮浓度,mg/L; Q_t 为吸附时间为 t 时煤粉对乙硫氮的吸附量,mg/g; V 为溶液体积,L; M 为投加煤粉质量,g。

2 结果与讨论

2.1 煤粉吸附剂特性

煤粉吸附剂扫描电子显微镜(SEM)谱图如图 1 所示,可以看出,煤粉表面结构复杂,具有丰富的孔隙结构,是一种天然吸附剂。利用 BEL 全自动氮气吸附仪对煤粉的比表面积和孔隙结构进行测定,其比表面积为 $10.785 \text{ m}^2/\text{g}$,总孔容为 $0.01895 \text{ cm}^3/\text{g}$,中孔孔容 $0.01652 \text{ cm}^3/\text{g}$,平均孔径 7.545 nm 。与活性炭等吸附剂相比,虽然煤粉比表面积和总孔容较小,但由孔径分布(图 2)可以看出,其孔隙结构以中孔为主,更加有利于大分子有机污染物的吸附。

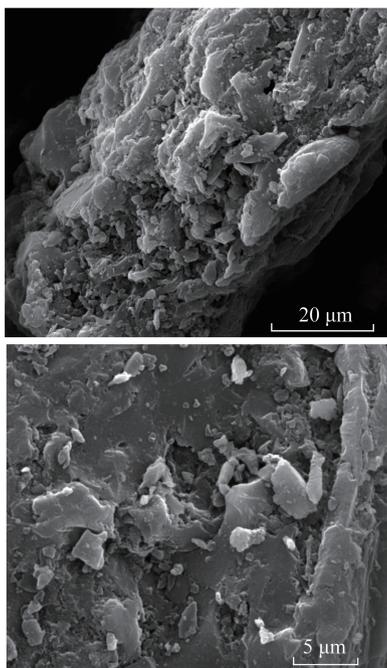


图 1 煤粉吸附剂表面 SEM 图

Fig.1 SEM diagram of coal powder

经测定煤粉吸附剂主要由 C、H、O 三种元素组成,其含量分别为 79.03%、5.56%、13.98%,N 和 S 的含量分别为 1.12%、0.31%。其红外光谱 (FTIR) 谱图如图 3 所示,可知其表面官能团主要为

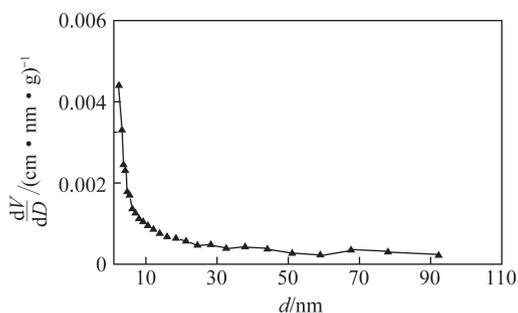


图 2 煤粉吸附剂孔径分布变化

Fig.2 Change of pore size distribution of coal powder

—OH、—C—OH 等。在 $3300 \sim 3650 \text{ cm}^{-1}$ 出现 —OH 的伸缩振动,其范围内的尖峰可能是煤粉表面吸附的水分子产生的,而宽峰则可能是由煤粉表面的 —OH 引起的; 1115 cm^{-1} 左右处为 —C—OH 的伸缩振动吸收峰。采用 Boehm 滴定法,测得煤粉中羧基、内酯基、酚羟基、碱基团含量分别为 12.86、12.67、15.83、21.76 mmol/g,可以看出煤粉表面富含含氧官能团,有利于乙硫氮等极性物质的吸附。

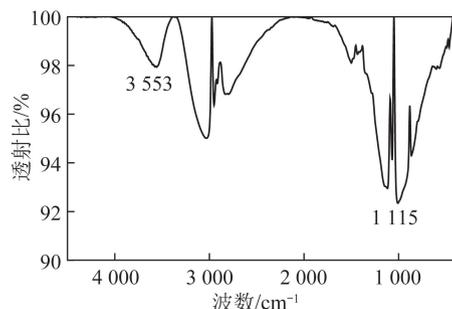


图 3 煤粉吸附剂的 FTIR 谱图

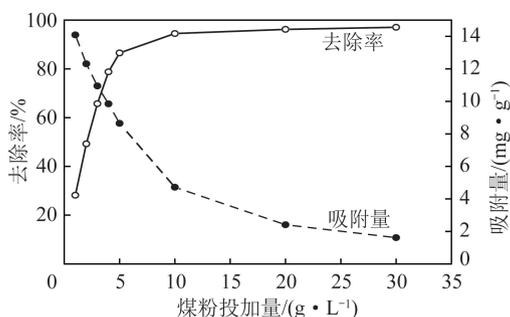
Fig.3 FTIR spectra of coal powder

2.2 煤粉用量对吸附效果的影响

煤粉吸附剂投加量是影响吸附效果的重要因素,配置浓度为 50 mg/L 的乙硫氮溶液,吸附剂用量即煤粉投加量为 1、2、3、4、5、10、20 和 30 g/L ,恒温密封振荡吸附时间 30 min,温度 298 K,振荡速度 150 r/min ,试验结果如图 4 所示。随着煤粉投加量的增加,溶液中乙硫氮去除率先增加后趋于稳定,这是由于随着煤粉投加量的增大吸附活性位点增多,吸附效果提升显著,添加过量后吸附效果趋于稳定,吸附量不断减小。当煤粉投加量为 5 g/L 时,乙硫氮的去除率达 86.53%,吸附量为 8.65 mg/g ,继续增加煤粉投加量,去除率增加缓慢,因此煤粉最佳投加量为 5 g/L 。

2.3 吸附时间对吸附效果的影响

乙硫氮分子移动到煤粉表面并进入煤颗粒内部空隙完成有效吸附需要一定时间,因此吸附时间对吸附效果影响较大。配置浓度为 50 mg/L 的乙硫氮



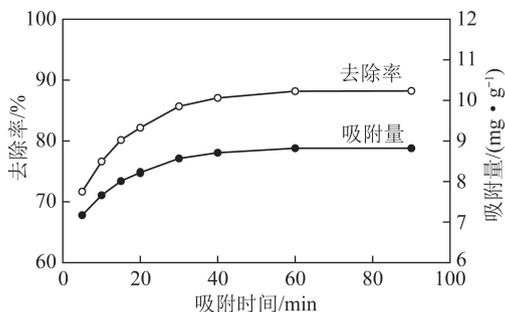
乙硫氮初始浓度50 mg/L, 吸附时间30 min,
温度298 K, 振荡速度150 r/min

图4 煤粉投加量对吸附效果的影响

Fig.4 Effect adsorption of coal powder dosage

溶液,煤粉投加量为5 g/L,恒温密封振荡吸附温度为298 K,振荡速度150 r/min,吸附时间分别为5、10、15、20、30、40、60和90 min,试验结果如图5所示。

由图5可以看出,随吸附时间的延长,乙硫氮的去除率和吸附量增加,开始时增加比较迅速,吸附时间达到30 min后,去除率和吸附量均趋于稳定,这是由于吸附开始时,煤颗粒表面具有较多的吸附活性位点,煤粉吸附乙硫氮分子速度较快,吸附一定时间后,煤颗粒表面的吸附位点趋于饱和,乙硫氮的吸附速率和脱附速率达到动态平衡,即吸附趋于平衡状态,乙硫氮的去除率和吸附量也趋于稳定,因此最佳吸附时间为30 min。



乙硫氮初始浓度50 mg/L, 煤粉添加量5 g/L,
温度298 K, 振荡速度150 r/min

图5 吸附时间对吸附效果的影响

Fig.5 Effect of adsorption time on adsorption

2.4 等温吸附性能

等温吸附曲线描述了恒定温度状态下吸附质分子在吸附剂表面吸附达到平衡时,吸附质分子在吸附剂表面的吸附量与吸附质分子在溶液中浓度的关系。乙硫氮的初始浓度分别为5、10、20、30、40、50 mg/L,煤粉投加量为5 g/L,振荡速度150 r/min,吸附时间为30 min,298 K条件下进行等温吸附试验,研究煤粉对乙硫氮的平衡浓度与吸附量的关系。Langmuir模型、Freundlich模型可用于描述碳质吸附

剂对溶液中有机物的吸附行为,本文采用这2种等温吸附模型对煤粉处理乙硫氮模拟选矿废水进行研究。

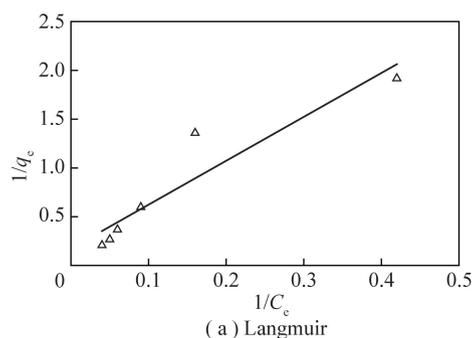
Langmuir模型和Freundlich模型线性表达式^[14]为

$$C_e/q_e = 1/(K_L q_m) + C_e/q_m \quad (3)$$

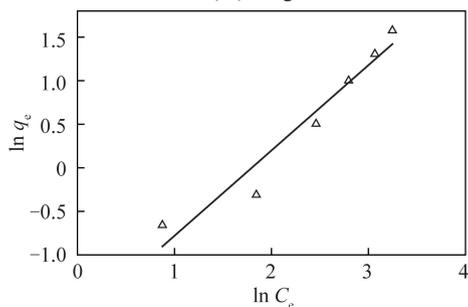
$$\ln q_e = \ln K_F + 1/n \ln C_e \quad (4)$$

式中, C_e 为吸附质平衡浓度,mg/L; q_m 为单分子层最大吸附量,mg/g; q_e 为平衡吸附量,mg/g; K_L 为吸附常数; q_e 为平衡吸附量,mg/g; C_e 为平衡浓度,mg/L; K_F 为常数,与吸附剂的种类和用量、吸附质的种类及温度有关; n 为常数,与吸附体系性质有关。

Langmuir模型、Freundlich模型线性拟合如图6所示,模型中相关参数计算见表1。



(a) Langmuir



(b) Freundlich

煤粉添加量5 g/L, 吸附时间30 min,
温度298 K, 振荡速度150 r/min

图6 Langmuir、Freundlich等温吸附模型线性回归

Fig.6 Linear regression of Langmuir and Freundlich isotherm model

表1 等温吸附模型拟合结果

Table 1 Fitting results of isothermal adsorption model

Langmuir 等温吸附模型				Freundlich 等温吸附模型		
K_L	q_m	R_L^a	R^2	K_F	$1/n$	R^2
0.039 3	5.611 7	0.337 5	0.884 5	0.172 0	0.979 6	0.941 2

注:拟合条件为煤粉添加量5 g/L,吸附时间30 min,温度298 K,振荡速度150 r/min; K_L 、 K_F 单位为L/mg, q_m 单位为mg/g。

由表1可知,煤粉对乙硫氮的吸附用Freundlich等温吸附模型的拟合相关系数 R^2 较高,优于Langmuir等温吸附模型,说明煤粉对乙硫氮的吸附

更符合 Freundlich 等温吸附模型。试验污染物浓度范围内,煤粉对乙硫氮存在多分子层吸附,同时由于煤粉中孔较多,乙硫氮分子直径较大,因此在煤颗粒表面不仅发生表面吸附,也存在孔径吸附,因此更符合 Freundlich 等温吸附模型,乙硫氮在煤粉上的 Freundlich 吸附等温线如图 7 所示。

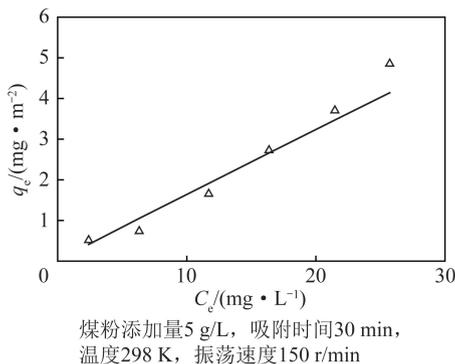


图 7 乙硫氮在煤粉上的 Freundlich 吸附等温线

Fig.7 Freundlich adsorption isotherms of diethyldithiocarbamate on Coal Powder

2.5 吸附动力学

试验过程和条件与 2.3 节相同,吸附时间为 5、10、15、20、30、40 min。利用吸附动力学,研究 CP 吸附剂吸附选矿废水污染物过程速率的变化,常用的吸附动力学方程主要有 Lagergren 准一级动力学方程、Lagergren 准二级动力学方程和 Weber-Morris 颗粒内部扩散模型,其表达式^[15]分别为

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - k_1 t \quad (5)$$

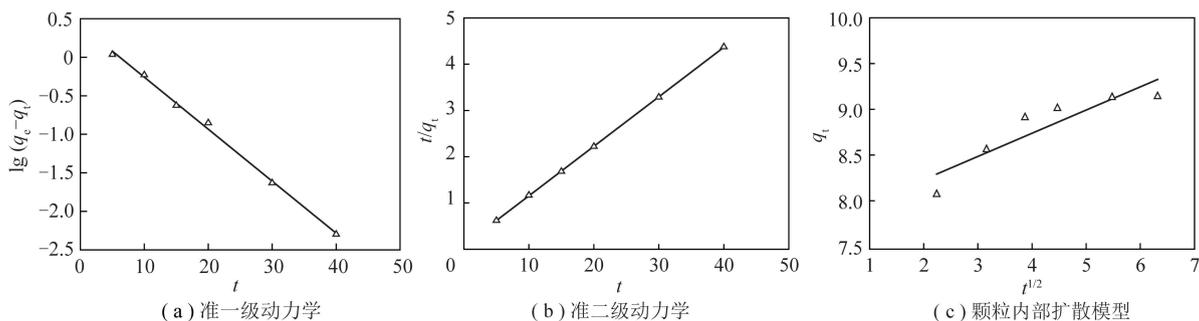


图 8 乙硫氮在煤粉上的准一级动力学、准二级动力学、颗粒内部扩散模型拟合曲线

Fig.8 Linear fit of pseudo-first order kinetics equation, pseudo-second order kinetics equation and intra particle diffusion model of diethyldithiocarbamate

表 2 煤粉吸附乙硫氮的动力学模型参数

Table 2 Kinetic parameters of diethyldithiocarbamate by coal powder

准一级动力学模型				准二级动力学模型				颗粒内部扩散模型		
$Q_e / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$q_{e1} / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$k_1 / (\text{min}^{-1})$	R^2	$q_e / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$q_{e2} / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$k_2 / (\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1})$	R^2	$k_{ip} / (\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1})$	C	R^2
9.09	3.01	0.060 9	0.954 8	9.09	9.35	0.096 2	0.999 9	0.253 6	7.724 7	0.828 3

注:拟合条件为乙硫氮初始浓度 50 mg/L,煤粉添加量 5 g/L,温度 298 K,振荡速度 150 r/min。

$$t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) + t/q_e \quad (6)$$

$$q_t = k_{ip} t^{1/2} + C \quad (7)$$

式中, q_e 为吸附达到平衡时吸附质在吸附剂表面的吸附量,mg/g; q_t 为 t 时刻吸附质在吸附剂表面的吸附量,mg/g; k_1 为准一级动力学吸附速率常数,1/min; k_2 为准二级动力学吸附速率常数,g/(mg·min); k_{ip} 为孔内扩散速率常数,mg/(g·h^{1/2}); C 为关于吸附边界层厚度的常数,mg/g。

图 8 为 3 种动力学模型对实际吸附数据的拟合结果,乙硫氮在煤粉表面吸附的动力学模型参数见表 2。可以看出,煤粉吸附乙硫氮的准二级动力学方程拟合相关系数优于准一级动力学方程,根据准二级动力学方程计算的平衡吸附量 q_{e2} 更接近试验实际结果,说明准二级吸附动力学模型更适合描述煤粉对乙硫氮的吸附过程。控制吸附速率包含 3 个过程:外部液膜扩散、表面扩散及颗粒内部扩散。Weber-Morris 颗粒内部扩散模型认为,如果吸附质在吸附剂表面的吸附以颗粒内部扩散为主要速度控制的情况下, q_t 与 $t^{1/2}$ 呈线性关系,且拟合的直线会通过原点,但图 8(c)拟合的直线并不过原点,且其模型参数 $C \neq 0$ (表 2),可以证实颗粒内部扩散在煤粉吸附乙硫氮过程中起一定的速率控制作用,但并不是主要的控制步骤。煤粉对乙硫氮吸附的 3 个过程中,表面扩散及颗粒内部扩散共同控制吸附速率,乙硫氮从界面扩散至煤颗粒表面,即表面扩散为主要的控制速率步骤。

3 结 论

1) 理化分析表明,煤粉表面结构复杂,具有丰富的孔隙结构,表面富含含氧官能团,是一种天然吸附剂。

2) 煤粉投加量和吸附时间均对乙硫氮的去除率和吸附量有较大影响,随煤粉投加量的增加,溶液中乙硫氮去除率先增加后趋于稳定,吸附量不断减小;随着吸附时间延长,乙硫氮的去除率和吸附量均增加。在乙硫氮溶液初始浓度 50 mg/L、煤粉投加量 5 g/L、振荡吸附时间 30 min 条件下,乙硫氮去除率达 86.53%,吸附量为 8.65 mg/g。

3) 煤粉对乙硫氮的吸附符合 Freundlich 等温吸附模型,动力学分析表明,准二级吸附动力学模型更适合描述煤粉对乙硫氮的吸附过程,而吸附的 3 个过程中,表面扩散及颗粒内部扩散共同控制吸附速率,以表面扩散为主导作用。

参考文献(References):

- [1] 严群,黄俊文,唐美香,等. 矿山废水的危害及治理技术研究进展[J]. 金属矿山,2010,39(8):183-186.
YAN Qun, HUANG Junwen, TANG Meixiang, et al. Research progress in the damage of mine wastewater and its treatment techniques[J]. Metal Mine, 2010, 39(8): 183-186.
- [2] 董金海,王忠应,谢恩龙. 云南某低品位铅锌硫化矿选矿工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分),2014(4):26-31.
DONG Jinhai, WANG Zhongying, XIE Enlong. Study on beneficiation process of a low grade lead-zinc sulfide ore in Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2014(4): 26-31.
- [3] 赵志强,杨林峰,缪建成,等. 栖霞山银铅锌矿选废水全回用技术的研究与应用[J]. 有色金属(选矿部分),2018(6):29-34.
ZHAO Zhiqiang, YANG Linfeng, MIAO Jiancheng, et al. Research and application of the all reuse of beneficiation wastewater technology of the silver bearing lead-zinc ore in Qixia mountain[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(6): 29-34.
- [4] 卢绿荣,陈建华,张一兵. 金属选矿废水处理现状及循环利用[J]. 现代矿业,2018(2):100-102.
LU Luyong, CHEN Jianhua, ZHANG Yibing. Current situation and recycling utilization of wastewater from metal beneficiation[J]. Modern Mining, 2018(2): 100-102.
- [5] 杨晓松,邵立南. 有色金属矿山酸性废水处理技术发展趋势[J]. 有色金属,2011(1):114-117.
YANG Xiaodong, SHAO Li'nan. Development tendency of non-

- ferrous metal mineral acidic wastewater treatment technology[J]. Nonferrous Metals, 2011(1): 114-117.
- [6] 谷艳玲,邓云武,冯寅. 铅锌选矿废水处理工艺研究概述[J]. 有色金属设计,2015(1):11-14.
GU Yanling, DENG Yunwu, FENG Yin. Introduction on wastewater treatment technology in lead-zinc ore processing[J]. Nonferrous Metals Design, 2015(1): 11-14.
- [7] 周吉奎,喻连香,胡洁. 用 Fenton 试剂处理福建某铜锌选矿废水[J]. 金属矿山,2014(12):209-212.
ZHONG Jikui, YU Lianxiang, HU Jie. Wastewater treatment from Fujian copper zinc ore Flotation plant with fenton reagent[J]. Metal Mine, 2014(12): 209-212.
- [8] 瞿艳芝,李谦,叶正芳,等. 曝气生物滤池处理模拟选矿废水研究[J]. 中国有色冶金,2018,47(2):91-95.
QU Yanzhi, LI Qian, YE Zhengfang, et al. Treatment of simulated flotation wastewater by biological aerated filter[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2018, 47(2): 91-95.
- [9] 董栋,郭保万,孙伟. 铅锌选矿废水净化处理试验[J]. 现代矿业,2013,29(9):143-145.
DONG Dong, GUO Baowan, SUN Wei. Purification and treatment of lead-zinc ore dressing wastewater[J]. Modern Mining, 2013, 29(9): 143-145.
- [10] 张明星,李华昌,于力,等. ADS-5 型大孔吸附树脂去除水中黄药的试验研究[J]. 矿冶,2010(1):91-93,97.
ZHANG Mingxing, LI Huachang, YU Li, et al. Study on the separation of butyl xanthate by ADS-5 absorption resin[J]. Mining and Metallurgy, 2010(1): 91-93, 97.
- [11] 文虹,边岳,王永田,等. 无机盐对长焰煤吸附苯胺的影响机理[J]. 煤炭技术,2017,36(12):279-282.
WEN Hong, BIAN Yue, WANG Yongtian, et al. Influence mechanism of inorganic salts on adsorption process of aniline on long flame coal[J]. Coal Technology, 2017, 36(12): 279-282.
- [12] GAO Lihui, LI Shulei, WANG Yongtian, et al. Organic pollution removal from coke plant wastewater using coking coal[J]. Water Science & Technology, 2015, 72(1): 158-163.
- [13] BIAN Yue, SUN Hao, LUO Yunxiao, et al. Effect of inorganic salt ions on the adsorption of quinoline using coal powder[J]. Water Science & Technology, 2018, 78(3): 496-505.
- [14] MALL Indra Deo, SRIVASTAVA Vimal Chandra, AGARWAL Nitin Kumar, et al. Adsorptive removal of malachite green dye from aqueous solution by bagasse fly ash and activated carbon-kinetic study and equilibrium isotherm analyses[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2005, 264(1): 17-28.
- [15] MALIK P Kumar. Use of activated carbons prepared from sawdust and rice-husk for adsorption of acid dyes; a case study of Acid Yellow 36[J]. Dyes & Pigments, 2003, 56(3): 239-249.